

ORMOS PÁL

A fény a biológiában



Ormos Pál
biofizikus
az MTA levelező tagja

Földünk napfényben fürdik. Vajon hogyan hasznosítják ezt az élőlények, s hogyan képesek maguk is világítani?

Az életet a Nap fénye táplálja. Így azután a fénynek az élet minden területén lényeges szerepe van: az életfolyamatokhoz szükséges energiát szolgáltatja, az érzékelés legfontosabb közege, életünk szabályozója. A fény és az élő szervezetek kölcsönhatása bonyolult biológiai, fizikai folyamatokon keresztül valósul meg. A kölcsönhatás nagyon sokrétű: a fényenergia átalakítása, a fény érzékelése vagy akár az élőlények saját világítása megannyi rendkívül érdekes jelenségkör.

Az előadás e területek jellemző folyamatait mutatja be, ismerteti a sajátosságokat és az általános törvényszerűségeket (a Nap és a földi élet; a fotoszintézis; a fehérjék; a bakteriorodopszin; a halobaktérium salinarum energetikai folyamatai, a bakteriorodopszin szerkezete és működése; a látás elemei; a fény a biológiai óra szinkronizációjában; a rodopszinok alkalmazása az optikai technikában; a fénykibocsátás a biológiában, a zöld fluoreszcens fehérje). Egyúttal arról is igyekszik képet adni, hogyan képesek egyes molekulák olyan bonyolult feladatok ellátására, melyeket mindennapi életünkben csak összetett gépekkel lehet megvalósítani.

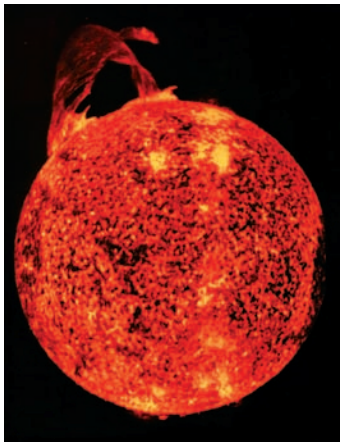
1951-ben született. 1975-ben végzett a szegedi József Attila Tudományegyetem fizikus szakán. 1982-ben a fizikai tudomány kandidátusa, 1992-ben akadémiai doktora lett; 1998-tól az MTA levelező tagja.

Pályáját 1975-ben az MTA Szegedi Biológiai Központ Biofizikai Intézetében kezdte, 1994-től az intézet igazgatója. 1985–1992 között az illinois-i egyetemen volt vendégprofesszor. A Magyar Biofizikai Társaság elnöke, a Szegedi Akadémia Bizottság alelnöke, az IUPAP (International Union for Pure and Applied Physics) alelnöke, az IUPAP Biológiai Fizikai Bizottság elnöke.

Főbb kutatási területei: fehérjék szerkezet–funkció kapcsolata, energiaátalakító fehérjék működése, egyrészecske manipuláció, nanobiotechnológia.



A kék bolygó



Napkitörés

A Nap és a földi élet

Lakóhelyünk, a Föld a Naprendszer harmadik bolygója. Valamennyi bolygó egyedi tulajdonságokkal rendelkezik. Természetesen nekünk a legérdekesebb a Föld, melyet messziről igazi szépségében csak kiváltságos űrhajósok láthatnak.

A Föld nagyon különbözik valamennyi bolygótársától. A legnagyobb különbség számunkra az, hogy életet hordoz. Az élet különös jelenség, jelenlegi tudásunk szerint a Naprendszerben egyedül a Földön alakult ki. Nem tudjuk viszont pontosan a kialakulás feltételeit, törvényszerűségeit. Az emberi fantáziát rendkívüli módon foglalkoztatja a Földön kívüli élet lehetősége, nagy energiával keressük a közelünkben és a távolban. Egyelőre azonban nem jártunk sikerrel, mindössze annyit tudunk tehát, hogy az élet az Univerzumban legalábbis ritka jelenség.

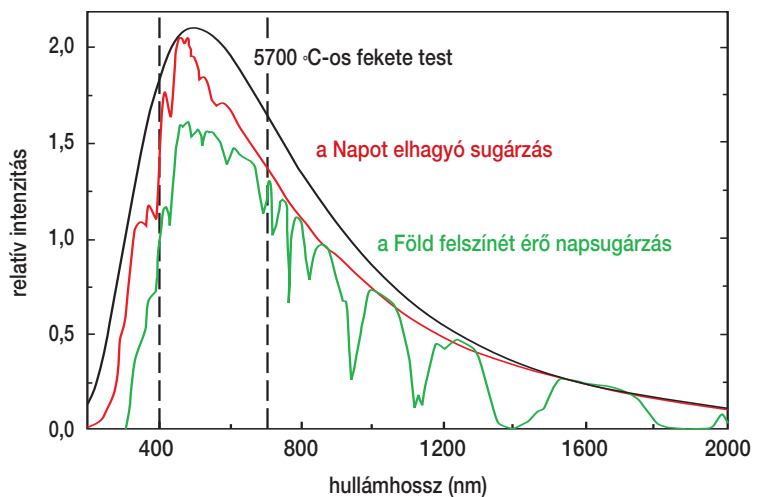
Mindenki tudja, hogy a magukra hagyott testek esetében a folyamatok iránya olyan, hogy általában a rendezetlenség nő. Az életre jellemző rendezettség igen nagy energia befektetését igényli, az élet kialakulásában, fenntartásában tehát meghatározó szerepe van az energiának. Az energia pedig a Nap sugárzásából származik. Minden meleg test hőmérsékleti sugárzást bocsát ki magából. E hőmérsékleti sugárzás jól ismert fizikai jelenség: ha ismerjük egy test hőmérsékletét, jellemezni tudjuk sugárzását is. A Nap felszíni hőmérséklete körülbelül $5700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Az ilyen meleg test sugárzásának színeképét (vagyis azt, hogy az egyes hullámhosszúságokra mekkora intenzitás jut) mutatja ábránk fekete vonala.

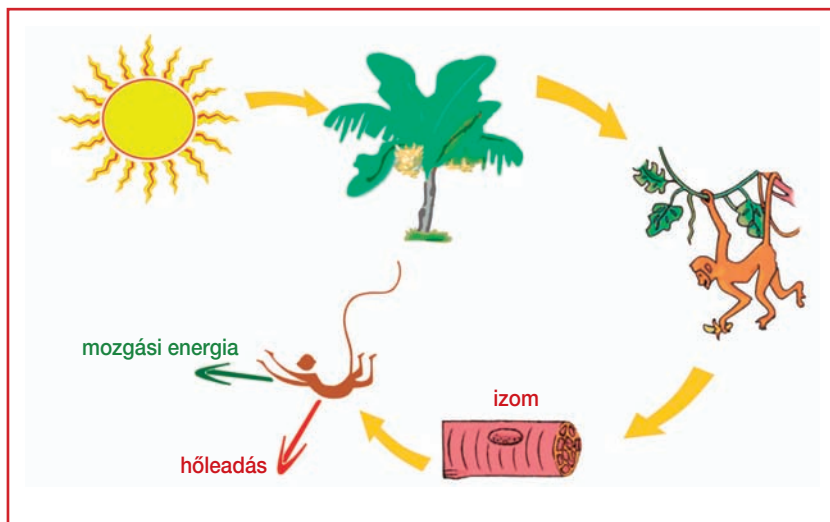
A Föld felszínére gyakorlatilag ugyanilyen színeképű sugárzás jut, a kis különbséget a sugárzás útjában levő közegek, elsősorban a földi légkör elnyelése okozza. Az ábrán a szaggatott vonalak által határolt tartomány jelenti a látható fényt – ez a körülbelül $400\text{--}700$ nanométer közötti hullámhosszúságú elektromágneses sugárzás. Látjuk a görbén, hogy éppen ez a tar-

A Földet érő napsugárzás színeképe

Színekép:

valamely anyag fényelnyelését, illetve fénykibocsátását jellemző görbe, mely megmutatja, hogy a vizsgált anyag különböző színű (hullámhosszú) fényt milyen mértékben képes elnyelni vagy kibocsátani.





A földi élet energia-körforgása

A fény szerepei

Energiaforrás,
környezeti információhordozó,
szabályozó elem.

Néhány fontos adat

A földet érő napsugárzás intenzitása:
 $1,4 \text{ kW/m}^2$
A teljes évi napsugárzás energiája:
 $1,6 \times 10^{18} \text{ kWh}$
A teljes évi földi energiafelhasználás:
 $9 \times 10^{13} \text{ kWh}$

A földi élet mérőöldkövei

A Föld kora: 4,5 milliárd év
A legidősebb kőzet: 3,8 milliárd év
A legrégebbi cianobaktérium:
3,5 milliárd év
Az oxigénlégtér kialakulása:
2 milliárd év
Az első többséjtű állat: 600 millió év
Az első hal: 530 millió év
Dinoszauruszok: 230 millió év
Homo sapiens: 150 ezer év

Vízbontás

energiabefektetést igénylő kémiai folyamat, mely során a víz oxigénre és hidrogénre bomlik.

omány képviseli a napsugárzás legintenzívebb részét: a teljes intenzitásnak majdnem a fele jut ide. Érthető ezért, hogy olyan élet alakult ki a Földön, amely a látható fényen alapul. Minden élőlény közvetlenül vagy közvetve a fény energiáját használja. Az élet energia-körforgásában szépen kitűnik az élővilág egysége.

A látható fény teljes mértékben meghatározza az életet, ez szolgáltatja az energiát, ezt a sugárzást látjuk (valamennyi élőlény, a növények is), vagyis ez a legfontosabb információhordozó, továbbá a különböző életfolyamatok szabályozásának is a fény az egyik legfontosabb eszköze. Előadásomban e sokszínűséget szeretném bemutatni, az alapvető folyamatokat ismertetem.

A napsugárzás intenzitása igen nagy: négyzetméterenként $1,4 \text{ kW}$ a Földet elérő teljesítmény. Ez a teljes Földre egy évben $1,6 \times 10^{18}$ kilowattóra energiát jelent. Óriási ez a szám, közel húszezerszer akkora mennyiség, mint az emberiség teljes energiafelhasználása. Energiánk tehát bőven van.

Ez a sugárzási energia teremtette meg az élet kialakulásához szükséges körülményeket is. Mint már említettem, nem tudjuk pontosan, milyen feltételei vannak az életnek, de valószínűleg igen szerencsések vagyunk, mert a két szomszédos bolygón, a Vénuszon és a Marson – annak ellenére, hogy az oda jutó sugárzás jellemzői nem nagyon különböznek – a jelek szerint nincs élet (a Marson ugyan nagy intenzitással keressük mostanában). Az élet tehát különlegesség, akár magától alakult ki a Földön, akár úgy került ide.

Rendkívül érdekes ugyanakkor az élet kialakulásának az időrendje. A Föld kérge 3,8 milliárd éves, ekkortól van tehát lehetőség az élet megjelenésére. Ausztráliában talált üledékes kőzetekben, úgynevezett sztramatolitikumban baktériumok lenyomatát fedezték fel. E kőzetek kora pedig 3,5 milliárd év. Eszerint a feltételek megteremtődése után a Föld történetéhez képest szinte azonnal megjelent az élet, legfeljebb háromszázmillió év alatt aránylag fejlett élőlények alakultak ki. Az élet bonyolultságát ismerve ez a tény megdöbbentő.

A korai baktériumok természetesen a fény energiáját használták, egyszerű fotoszintézist folytattak. Később megjelentek **víz bontására** képes élőlények is. A vízbontás eredményeként oxigén szabadult fel, s körülbelül két-

Fotoszintézis:

azon folyamatok neve, melyek eredményeként egyes baktériumokban, algákban, illetve növényekben a fényenergia kémiai energiává alakul, s szervetlen anyagokból szerves molekulák épülnek fel.

Kloroplasztisz:

a növényi levelek sejteiben található szervecske, melyben a fotoszintézis zajlik.

Biológiai membrán:

sejteket, sejtszerveket határoló vékony hártya, a hozzá kapcsolódó fehérjék és szerves molekulák révén az élet alapvető szerkezeti eleme.

Klorofil:

fényelnyelő szerves festékmolekula (pigment), mely a fotoszintézis során „befogja” a fénysugárzást.

milliárd évvel ezelőtt kialakult a ma is jellemző oxigén-légkör. Ezzel pedig megteremtődött az állatok kialakulásának a feltétele. Ők – köztük mi, emberek is – az életfolyamatokhoz szükséges energiát a más élőlényekből származó szerves anyagok (azaz a táplálék) elégetésével nyerik, tehát a napenergiát közvetve hasznosítják.

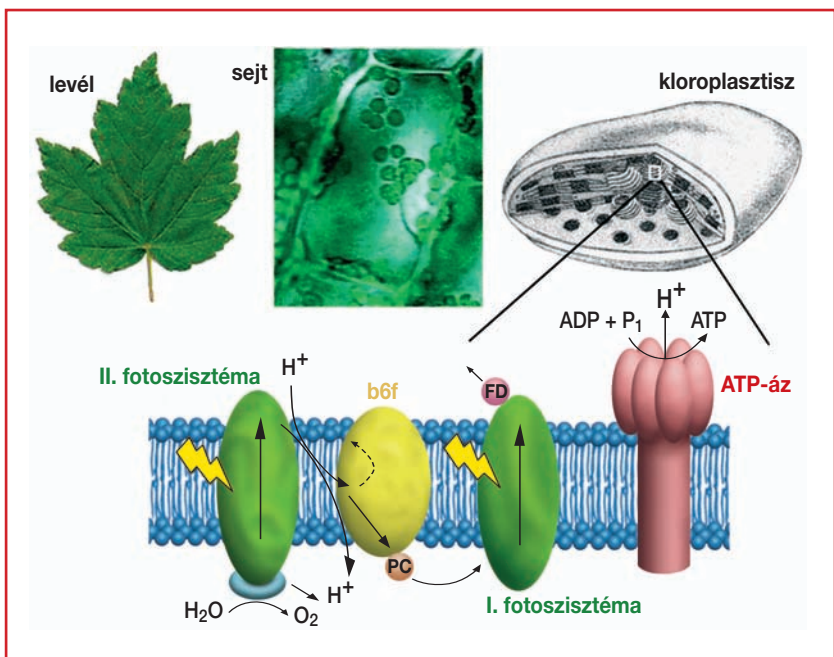
A fotoszintézis

A fényenergia közvetlen biológiai átalakításának több módja alakult ki az evolúció során. Legfejlettebb a zöld növények leveleiben zajló **fotoszintézis**. E folyamat eredményeként az elnyelt fény energiáját a növény arra fordítja, hogy a vizet elbontja hidrogénre és oxigénre, valamint nagy energiatartalmú cukrot készít. Az oxigén gáz formájában felszabadul, a hidrogént pedig a légkörből felvett szén-dioxid molekulával megfelelő arányban összerakva készíti a növény a cukrot, a szénhidrátot. Az átalakítások eredményeként az elnyelt fény energiájának jelentős része hasznosul, a legmodernebb napelemek sem képesek hatásosabb működésre.

A fotoszintézis a levelek sejteinek speciális szervecskéiben, a **kloroplasztiszokban** történik. Bonyolult folyamatról van szó, mely sok elemi lépésben zajlik. Az egyes lépéseket erre a feladatra szakosodott biológiai molekulák, fehérjék végzik. Az egész rendszer **membránokban**, igen vékony hártyákban helyezkedik el, az összetett feladatnak megfelelően bonyolult elrendeződésben. A fényt zöld színű **klorofil**molekulák nyelik el, ők veszik fel első lépésben az energiát. A felvett energiát használja azután a szervezet különböző egységeiben a kémiai átalakításokra.

A fénysugárzás részecskéi, hordozói a **fononok**. A fény színe meghatározza

A zöld növények levelében található energiaátalakító rendszerek. A fényenergia átalakítását elsődlegesen a két fotoszisztéma végzi



a foton energiáját. A látható fénnel az a helyzet, hogy egyetlen foton energiája nem elegendő a fotoszintézisben lezajló lépések táplálására. Egy cukormolekula előállításához, de egyetlen vízmolekula elbontásához is több foton energiájára van szükség. A fotoszintetizáló rendszer ezért több lépésben végzi munkáját, az egyes fotonok energiáját a megfelelő pillanatig tárolja.

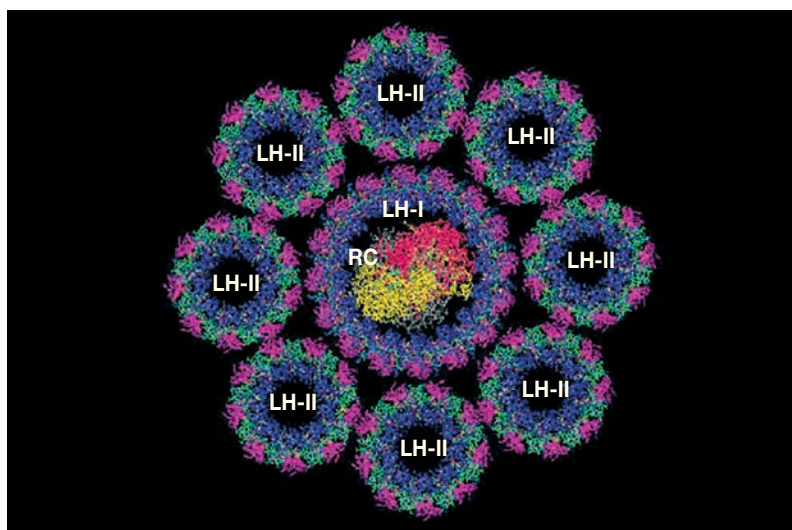
A jó hatásfok eléréséhez külön antennarendszer is kifejlődött az evolúció során. A fotoszintézist végző reakciócentrumok környezetében helyezkednek el az úgynevezett antennafehérjék. Ezekben ugyancsak klorofillmolekulák nyelik el a fotonokat, majd továbbadják a reakciócentrumoknak. Az energiaátadást nagyon speciális rendben elhelyezkedő antennafehérjékkel lehet jó hatásfokkal megoldani. Az alábbi képen látható teljesen szabályos elrendeződés egyszerűbb, de jobban ismert rendszerre, a bakteriális reakciócentrumra vonatkozik, a zöld növények is hasonlóak. A kép arra is jó példa, hogy a természet milyen esztétikus alakzatokat tud létrehozni.

Foton:

az elektromágneses sugárzás (fény) részecskeszerű tulajdonságokat is mutató elemi egysége, kvantuma.

Fehérjék:

az élet alapvető folyamatait végző molekuláris „gépek”.



Fotoszintetizáló baktérium fényenergiát begyűjtő antennarendszerének szerkezete [Theoretical Biophysics Group, Beckman Institute, University of Illinois at Urbana-Champaign]

Látjuk, a fotoszintézis a jó hatásfokot nagy bonyolultságú apparátussal éri el. A következőkben az energiaátalakítás fizikai alaplépéseit szeretném megértetni. Többször beszéltem eddig is a fehérjékről – amelyek a biológiai tárgyú előadások szerves részei. Most megismerkedünk egy kicsit közelebbről is ezekkel a molekulákkal, majd részletesebben elemzünk egy egyszerűbb fényenergia-átalakító rendszert.

A fehérjék

Az élet molekulái a **fehérjék**. Az életre jellemző összes folyamat a fehérjékkel van kapcsolatban. Ez érvényes – a másik jellemző és híres molekulatípusra – a nukleinsavakra is, hiszen azok éppen a fehérjék készítésében vesznek részt. A fehérjemolekulák a szerkezeti elem szerepét is betölthetik, de

Aminosavak:

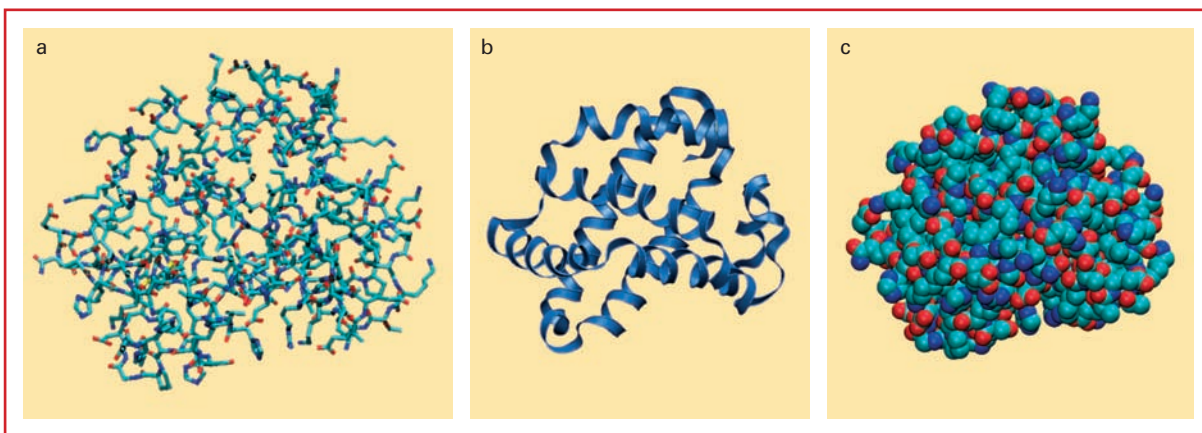
a fehérjék építőelemei, melyek kémiai kötésekkel láncszerűen kapcsolódnak össze.

Aminosav-oldallánc:

az aminosavak az egymáshoz való kapcsolódást biztosító kémiai csoportokon kívül egyéb atomi szerkezeteket is tartalmaznak, ezek különbözősége adja az egyes aminosavak eltérő tulajdonságait (töltéssel rendelkező vagy semleges, poláros vagy apoláros stb.).

bonyolult működésű gépek is lehetnek – ilyenek például a most tárgyalt fotoszintézis fehérjéi.

A fehérjék egyszerű, de korlátlan sokszínűséget biztosító szabályok szerint épülnek fel. Építőelemük az ún. **aminosav**, melyből húszféle létezik. E kis molekulák két fő részből állnak: az egyik minden aminosavban azonos, ehhez csatlakozik a másik rész, az **oldalláncnak** nevezett speciális csoport, mely a különböző fehérjék jellemző tulajdonságaiért felelős. A húszféle oldallánc között van egészen kicsi, melyet mindössze egy hidrogénatom alkot (ez a legkisebb atom), és van köztük nagyobb, néhányszor tíz atomból álló. Az oldalláncok tulajdonságai ennek megfelelően különbözőek: vannak elektromosan töltöttek, semlegesek stb. Az azonos részek segítségével az aminosavak egymáshoz kapcsolódnak, láncot hoznak létre: ezt nevezzük fehérjének. Az, hogy a fehérjének milyen tulajdonságai lesznek, azon múlik, milyen sorrendben követik egymást az oldalláncok. A sorrendet egyébként a DNS-molekula kódolja. A fehérjét alkotó lánc általában néhány száz aminosavból áll. Végül egy fehérjemolekulát néhány ezer atom alkot.



A miogloblin fehérje szerkezete különböző ábrázolásokban (a) vonalas térszerkezet; (b) a polipeptid lánc vonulata; (c) az atomok valódi méretét feltüntető ábrázolás

Érdekes kicsit elidőzni azon, hogy eme egyszerű szabályok korlátlan variációs lehetőséget biztosítanak. Említettem, hogy húszféle aminosav van. Egy 100 elem hosszúságú láncot 20^{100} -féleképpen lehet összeállítani. Ez pedig hihetetlenül nagy szám: a teljes világegyetemben nincs ennyi atom. Azt lehet tehát mondani, hogy gyakorlatilag végtelenül sokféle fehérje állítható elő.

A néhány száz elemből álló aminosavlánc feltekeredik, megfelelő szerkezetet vesz fel. A kémiai szerkezeti képletek rajzolásakor szokásos eljárással ábrázolva a fehérjemolekulát, nehezen értelmezhető kuszaságot látunk.

Közelebből vizsgálva sok molekulát, észrevesszük, hogy a rendezetlen szakaszok mellett bizonyos szabályos szerkezeti elemek ismétlődnek, autórugó alakú ún. hélixek alakulnak ki stb. A lényeges elemeket kiemelve jobban áttekinthető ábrázoláshoz jutunk. Fontos azonban, hogy a molekula meglehetősen tömött gombolyag: ez jól látszik, ha úgy ábrázoljuk, hogy az egyes atomok valódi méretükkel látszanak. Ez a bonyolultság tehát lehetővé teszi, hogy minden életfolyamatot ellátni képes, lenyűgöző változatosságú és működésű molekulák jöhessenek létre.

A fehérjék működésének teljes megértéséhez a térbeli szerkezet ismeretére van szükség. Ma úgy tudjuk, az aminosavsorrend egyértelműen meghatározza a térbeli szerkezetet is, nem ismerjük azonban teljesen a szabályokat, jelenleg még nem tudjuk megmondani, milyen aminosavsorrend milyen szerkezethez tartozik. Néhány igen bonyolult kísérleti módszer alkalmas a szerkezet meghatározására. A feladat nehézségét mutatja, hogy az első fehérjeszerkezetet csak 1960-ban, tehát már az űrkorszakban határozták meg.

A bakteriorodopszin

A Halobacterium salinarum energetikai folyamatai

A zöld növények fotoszintézisének jóval egyszerűbb biológiai fényenergia-átalakító rendszert ismertünk meg az utolsó évtizedekben. A *Halobacterium salinarum* nevű baktérium életfolyamatait vizsgálva új, korábban nem ismert energiaháztartás tárult fel. E baktérium nagy sókoncentrációjú tengervízben él, nagyon elszaporodik tengermelléki sólepárló telepeken. Kiderült, hogy a baktérium sejtmembránjában a szemben található **rodopszin** nevű látóanyaghoz nagyon hasonló fehérje található, melyet így **bakteriorodopszinnak** neveztek el. E baktérium életében, energetikájában a bakteriorodopszinnak kulcsszerepe van: a fény energiáját hasznosítja a baktérium számára.

A baktériumban lezajló folyamatok az általános biológiai energiaátalakítási törvényszerűségeket is igen szemléletesen mutatják. A mi szempon-tunkból a baktérium a környezetétől a sejtmembrán által elválasztott, elszigetelt térfogat. Ezen a membránon anyag csak erősen szabályozva, megfelelő fehérjéken keresztül juthat át. Ezért azután az egyes anyagok – oldott ionok – mennyisége kívül és belül nem feltétlenül azonos. A membrán két oldala közti **koncentrációkülönbségek** általában jelentősen befolyásolják az életfolyamatokat. Az ionok közül kiemelendően fontos a hidrogénion, a **proton**. Tudjuk, a víz hidrogénből és oxigénből áll, és mindig igen nagy mennyiségben tartalmaz hidrogénionokat, az élő szervezetekben bőven van proton, ha bármilyen célból szükség lenne rá.

Fény hatására a bakteriorodopszin fehérje protont pumpál a sejtmembránon keresztül, ennek eredményeként a protonok koncentrációja kívül és belül eltér egymástól. A koncentrációk különbsége természetesen energiát hordoz – a protonok vissza akarnak jutni. Hasonló a helyzet, mint két, csővel összekötött víztartály esetében, amikor nem egyenlők a vízszintek. A víz a magasabb helyről át akar folyni az alacsonyabb felé, és ha kis turbinát helyezünk a csőbe, akkor az energiakülönbséget ki is használhatjuk, hiszen az átfolyó víz megforgatja. Ugyanígy a bakteriorodopszin által létrehozott protonkoncentráció-különbség energiáját is felhasználja a sejt. A membránban más fehérjék is elhelyezkednek, olyanok, amelyek a protonkoncentráció-különbséget képesek felhasználni. Ilyen például a sejtet mozgató mo-

Rodopszin:

a retinált tartalmazó fehérjék összefoglaló neve.

Bakteriorodopszin:

egyes sókedvelő baktériumokban található fehérje, mely fényenergia segítségével protont pumpál a sejtől a külső térbe.

Koncentráció:

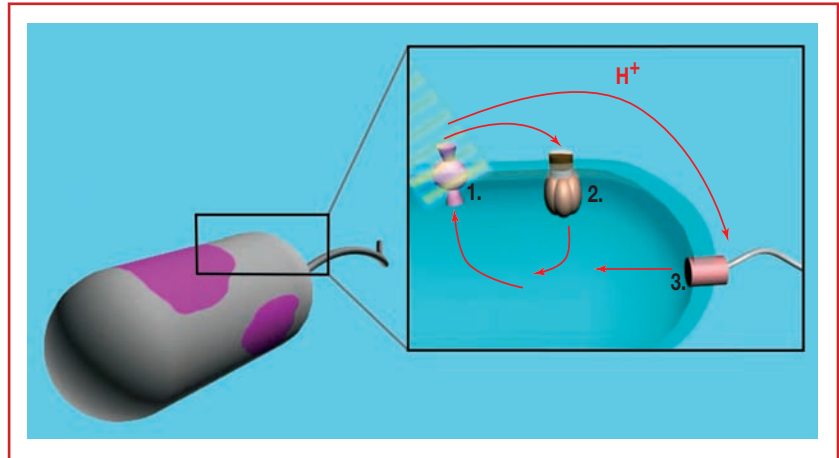
fizikai-kémiai mennyiség, mely megadja, hogy valamely molekulából mennyi található bizonyos térfogatban.

Proton:

pozitív töltésű elemi részecske, az atommagok egyik összetevője. (A hidrogénatom magja egyetlen protonból áll, mely körül egyetlen elektron kering. Ha ettől az elektrontól megfosztjuk a hidrogénatomot, hidrogénion keletkezik, mely tulajdonképpen egy proton.)

tor: ez hosszú szálakat, flagellákat forgat egy tengelyen, és ezek propellerként hajtják a sejtet. A forgatáshoz szükséges energiát a motor a protonkoncentráció-különbségből szerzi be.

A Halobaktérium salinarum energiaháztartása. Fény hatására a bakteriorodopszin protonokat pumpál a sejten kívülre, és azok később más energiafelhasználó fehérjéken jutnak vissza. 1. bakteriorodopszin protonpumpa; 2. ATP-áz protonpumpa; 3. Motor fehérje



További fontos energiaátalakító fehérje az ún. ATP-áz. Az **ATP** nevű molekula az élő rendszerekben széles körben használt energiatároló anyag: kialakításához energia szükséges, lebontásakor energia szabadul fel. A kialakítást és a lebontást ATP-áz enzimek végzik: vannak olyanok, amelyek az ATP felépítéséhez szükséges energiát a membránon keresztüli protonkoncentráció-különbség energiájából nyerik. A baktérium esetében tehát úgy alakul át a fény energiája közvetlenül hasznosítható energiává, hogy először a bakteriorodopszin protonpumpa protonokat pumpál a membránon keresztül, majd a kialakult koncentrációkülönbséget az ugyanebben a membránban másutt levő ATP-áz vagy motormolekula használja fel.

E folyamat révén nagyon általános energetikai szabályokat ismertünk meg: a biológiában kulcsszerepük van az egymástól membránokkal elválasztott térrészeknek. A különböző energiatermelő és -felhasználó rendszerek közötti energetikai kapcsolatokat a membránon keresztüli ion- (elsősorban proton-) koncentrációkülönbség közvetíti – így adódik át az energia egyik helyről a másikra. E szabályt **Mitchell-féle kemiozmotikus hipotézis**nek hívják, körülbelül harminc éve ismerjük, és általános elfogadottságában nagy szerepe volt a most tárgyalt modellrendszernek.

A bakteriorodopszin szerkezete, működése

A bakteriorodopszin fehérjemolekula egyedül végzi a fényenergia átalakítását, az alapvető fizikai folyamatok tanulmányozására ezért különösen alkalmas. A fehérje kétszázötven aminosavból álló lánc, a kisebb fehérjék közül való. Bíbor színét egy hozzá kapcsolódó adalék festékmolekula, a **retinal** adja. A retinal közös festékanyag, ilyen molekulától ered a répa sárga színe. Ez tulajdonképpen az A-vitamin egyik formája, melynek jelentőségéről később még beszélünk. A retinalmolekula fény elnyelésének hatására megváltoztatja alakját, az alakváltozás a fényenergia átalakításának első lépése.

ATP:

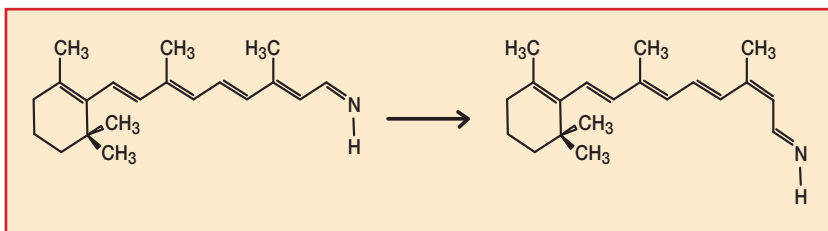
adenozin-trifoszfát; a sejtekben az energia tárolására szolgáló molekula; kialakításához energia szükséges, lebontásakor energia szabadul fel.

Mitchell-féle kemiozmotikus hipotézis:

a sejtek energiaháztartását leíró modell, mely szerint a sejt egyes energiatermelő és -felhasználó egységei közti kapcsolat ionok (elsősorban protonok) membránon keresztüli koncentrációkülönbségén jön létre.

Retinal:

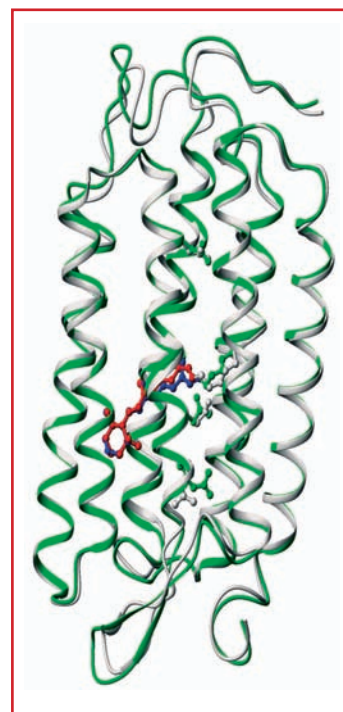
fehérjékhez kapcsolódó, A-vitaminból származó vegyület, mely fény hatására szerkezetváltozáson megy keresztül.



A retinalmolekula fényreakciója

A későbbiekben a retinal és a fehérje csatlakozásánál levő csoport (ez nagyjából a membrán közepén, a pumpálás „félútján” található) lead egy protont. A proton néhány lépésben kijut a membránon kívülre, majd a folyamat végeztével a bakteriorodopszin protont vesz fel a másik oldalról, így áll vissza az eredeti helyzet. A ciklikus protonpumpálás iránya meghatározott, akkor is belülről kifelé zajlik, ha a külső oldalon több proton van. A molekula működésének vizsgálata az egyes lépések azonosítását, jellemzését jelenti. Tudjuk, hogy a protonok különböző aminosav-oldalláncokon lépkedve haladnak végig a molekulán. A fehérje speciális szerkezete biztosítja, hogy a protonok csak a megfelelő irányba haladjanak. Lényeges lépése a pumpálásnak, hogy a pumpált proton helye a ciklus első felében a külső térrész felé, a végén pedig a belső térrész felé nyitott. Ezt a fehérje úgy biztosítja, hogy megfelelő időben megváltoztatja alakját. Sikerült jellemeznünk e fontos alakváltozás atomi részleteit. Eljárást dolgoztunk ki a kritikus állapotok befagyasztására, és a fehérjék szerkezetének vizsgálatára legalkalmasabb módszer – a Röntgen-szórás – alkalmazásával meghatároztuk a szerkezetet az egyes állapotokban. A jobb oldali ábra a molekulát a működés két állapotában ábrázolja. A molekula közepe táján látható a retinal festékmolekula. Az ábra a fehérjék tipikus működés közbeni mozgását is illusztrálja.

A bakteriorodopszin tehát fénnel hajtott molekulagépnek tekinthető, melynek működésében a mechanikus elemeknek nagy szerepük van. Működését az alábbi egymást követő eseményekkel írhatjuk le – persze elnagyolva, de valószerűen –: a fény elnyelését követően megváltozik a retinal adalékmolekula alakja. Ez az alakváltozás mechanikai feszültséget okoz a fehérjében, így tárolódik először a fény energiája. E feszültségek révén a jóval nagyobb fehérje lassan szintén megváltoztatja alakját. Ezen alakváltozások során egyes protonátadó csoportok egymáshoz viszonyított helyzete változik, ez a protonok rendezett mozgását eredményezi. Nyilvánvalóan kritikus a működés szempontjából, hogy az átrendeződések megfelelő sorrendben kövessék egymást: ezt a fehérjemolekula konstrukciója biztosítja, ez a működés kulcsa.



A bakteriorodopszin fehérje alakváltozása a működés során. A zöld színű szerkezet az alapállapot. A retinal molekula külön színnel van jelölve: a zöld fehérjeszerkezethez a piros retinal tartozik, a szürkéhez pedig a kék

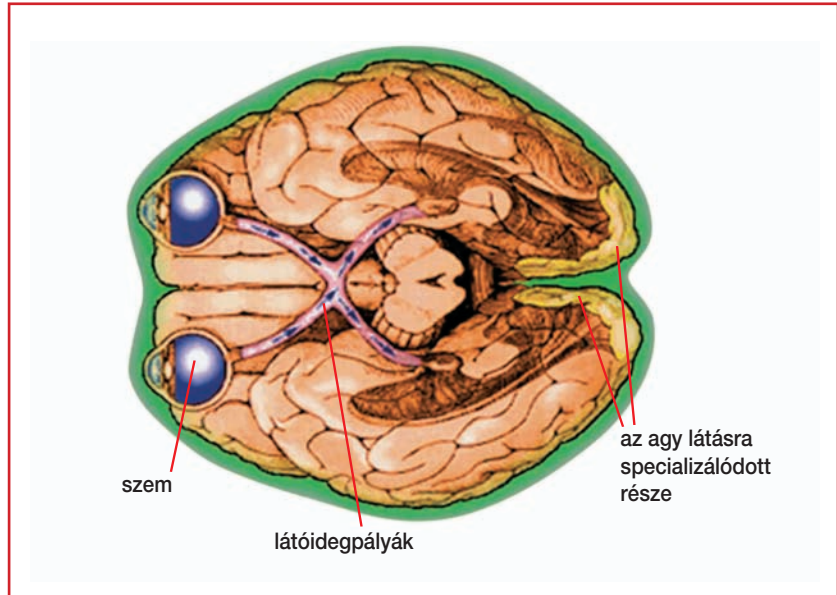
A látás elemei

A látható fény az érzékelés legfontosabb közege is egyben. Az élőlények sokfajta fizikai eredetű jelzót használnak, olyanok is vannak – bár kivétel-számba mennek –, amelyek számára a fény nem is lényeges. Mégis általában elmondható, hogy a fény a legszélesebb körben használt tájékozási

információforrás. A tájékozódás során a környezetünkről úgy szerzünk információt, hogy a szóródott (vagy éppen kibocsátott) látható fényt érzékeljük. Szinte minden élőlény „lát”, még a növények is. Most a gerincesek, elsősorban az ember látásának idevonatkozó elemeit tekintjük át a teljesség igénye nélkül.

A látás fontosságát, bonyolultságát azonnal megítélhetjük, ha olyan képre tekintünk, amely az emberi fej metszetét mutatja a szem magasságában. Feltűnő, hogy milyen nagyok a szemek, illetve a látóidegek az agy teljes méretéhez képest is.

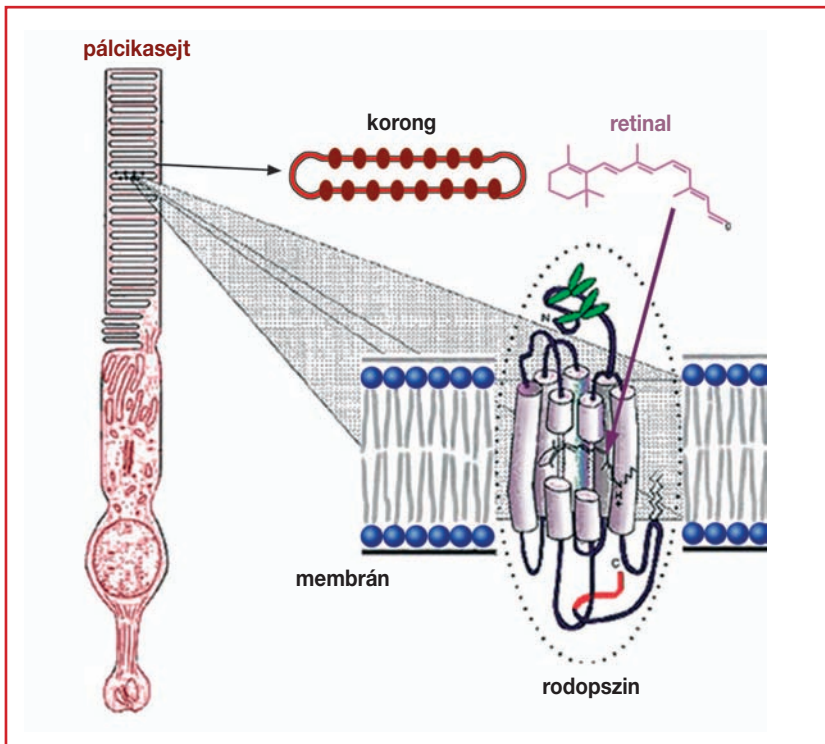
Az emberi fej metszete a szem magasságában



A szem kifinomult optikai eszköz. Az optikai elemek feladata az, hogy a külvilágot jó minőségben leképezzék a szemfenékre, a retinára. A **retina** mint egy tévékamera detektora érzékeli a képet, átalakítja az idegrendszer számára érthető elektromos ingerekké, majd a kezdeti jelfeldolgozás után az agyba küldi. Most az első folyamatokkal foglalkozunk.

A retina aktív elemei a fényérzékelő sejtek: a pálcikák, csapok. A következő ábránk egy pálcikasejt szerkezetét mutatja (a csapsejtek szerkezete, működése nagyon hasonló, ezért nem tárgyaljuk őket külön). A pálcikasejtek fényérzékeny elemei a sejt hosszú részében egymás felett elhelyezkedő korongok. E korongok membrán által elválasztott térrészeket képviselnek. A membránban található a látásért felelős molekula, a rodopszin. Neve nem véletlenül hasonló a korábban megismert bakteriorodopszinhoz: szinte ugyanolyan molekuláról van szó. Nagyon hasonló a fehérjerész, a szint ez esetben is a retinal adalék festékmolekula adja. Még a színe is ugyanúgy bíbor – látóbíborknak is hívják.

A látás első lépése analóg a már korábban megismerttel. Először foton elnyelésének hatására a retinalmolekula megváltoztatja alakját. Ez a fehérjében feszültséget kelt, majd a fehérje is alakváltozást szenved. Ettől kezdve azonban a bakteriorodopszin és a szemrodopszin működése eltér. A szemrodopszin esetében maga az alakváltozás indít el egy biokémiai



A pálcika látósejtek szerkezetének elemei

reakciósort, amelynek eredménye a látásinger. Az alak megváltozását egy másik fehérjemolekula (az úgynevezett G fehérje) veszi észre egyszerűen úgy, hogy van egy olyan tartománya, amely jól illeszkedik a fényerjesztés utáni, megváltozott alakú rodopszinmolekulához. (Jól jegyezzük meg, hogy a fehérjék alakváltozásának detektálása ilyen alakfelismeréssel nagyon általános út a biológiai jelátvitel folyamataiban.) A G fehérje aktiválása bonyolult reakciósort indít el – ennek lényeges lépése a korong membránjában levő **ioncsatornák** bezárása, illetve ennek eredményeként a membránon levő elektromos feszültség megváltozása. A jel végül a sejtről ingerként elvezetődik.

A G fehérjével indított biokémiai út igen bonyolult – nem véletlenül. Egészen bámulatos ugyanis a szem érzékenysége a dinamikája, az a képessége, hogy nagyon gyenge fényt is meglát, de nagyon erős fényt is el tud viselni. Adatok vannak arra, hogy optimális esetben egyes fotonokat is észre tudunk venni, ugyanakkor napsütésben sem vakulunk meg. Ez a fényintenzitást tekintve mintegy tizennégy nagyságrendnyi változást jelent, ami hihetetlenül nagy arányszám. Aki ért a fényképezéshez, az tudja igazán értékelni ezt a képességet. Fényképezéskor más-más fényviszonyok eltérő érzékenységgű filmet igényelnek, ugyanakkor szemünk szélsőséges fényviszonyok mellett is működik. A legjobb filmek a megvilágítás mintegy két nagyságrendnyi megváltozását képesek rögzíteni, vagyis a szem a filmhez képest 10^{12} -szer (ez milliószor millió) nagyobb fényintenzitás-tartományt fog át.

Láthatjuk, hogy a retinalmolekula a látásban is kulcsszerepet játszik. E molekulát szervezetünk nem termeli, ezért van szükségünk A-vitaminra, például a nagy A-vitamin-tartalmú sárgaréparra, és ezért okoz hiánya szürkületi vakságot.

Retina:

a szemfenék azon része, mely a szem optikai elemei által a külvilágról alkotott képet érzékeli, s idegi impulzusokká alakítja.

Ioncsatorna:

olyan óriásmolekulák, melyek bizonyos ionoknak a biológiai membránon, sejtmembránon való átjutását biztosítják.

A fény a biológiai óra szinkronizációjában

Életünk ritmusa követi a napszakok változását: nappal aktívak vagyunk, éjjel pihenünk, alszunk. Úgy is szoktuk mondani, hogy a Naphoz vagyunk szinkronizálva. Akik utaztak már tengerentúlra, és napokig szenvedtek attól, hogy nem tudtak gyorsan alkalmazkodni az időeltolódáshoz, tudják, hogy biológiai óránk átállítása nem egyszerű feladat. A jelenség folyamatait nem ismerjük még pontosan, de a legutóbbi időben sok mindent megtudtunk a mögöttes eseményekről.

A biológiai aktivitás ciklikus váltakozását egy önmagától járó, nagyjából 24 órás periódusú óra szabályozza. Az óra működéséről tudjuk, hogy a gének működési sebességén alapuló, oszcilláló kémiai reakcióra épül. Ha valaki napokig a világtól elzárva sötétben van, akkor is közel 24 órás ritmussal zajlik az élete. A sötétben is járó órát azonban szinkronizálni lehet a fénnel, előbb-utóbb szervezetünk átveszi a fény váltakozásának ritmusát. Nem tudjuk pontosan, melyik érzékelő szervünk adja a szinkronizációhoz szükséges fényjeleket a biológiai órának. A közelmúlt szolgáltatott néhány új adatot e téren: az érzékelő a szemben van, de nem a retinában (természetesen nem kell képet látnunk, elég a fény detektálása, ez pedig bárhol történhet). Működésképtelen retinával rendelkező egyedek esetén is van szinkronizáció, a szem eltávolítása esetén viszont a szinkronizáció sérül. Azt is tudjuk, hogy az érzékelés anyaga ez esetben is retinal-fehérje komplex, tehát valószínűleg rodopszinnal rokon molekula.



A tengerek csodálatos élővilága

Érdekes elgondolkodni azon, hogy mennyire különböző szervezetekben, mennyire különböző szerepekben alkalmazza a természet szinte ugyanazt a molekulát – a rodopszin egymáshoz hasonló változatait. Láttuk, hogy a rodopszin egy egyszerű baktérium energiaforrása, a látás érzékelő anyaga, és a napi ritmust szabályozó fényérzékelésben is szerepe van. A természet gazdagságos: ha egy evolúciós termék sikeres, több helyen is alkalmazni próbálja.

A szabályt két éve új felfedezés erősítette meg: genetikai vizsgálatok alapján kiderült, hogy egy mindenütt meglevő, igen közönséges baktérium (a SAR 86) is tartalmaz rodopszint. A részletesebb vizsgálat kiderítette, hogy szerepe itt is ugyanaz, mint a *Halobacterium salinarum* esetében: a napfény energiájának hasznosítása. E baktérium igen nagy mennyiségben van jelen valamennyi tengerben, óceánban, ami azt jelenti, hogy a földi napfényenergia-hasznosításban sokkal nagyobb a rodopszin szerepe, mint korábban gondoltuk.

A rodopszinok alkalmazása az optikai technikában

A modern biotechnológia egyik lényeges irányzatában biológiai eredetű anyagok gyakorlati alkalmazhatóságát vizsgálják. Tulajdonképpen magától értetődő dologról van szó, hiszen az evolúció által évmillióig fejlesztett, adott biológiai feladatra optimalizált anyagoknak a technikai alkalmazás

szempontjából is előnyös tulajdonságai vannak. A gyakorlati alkalmazhatóságokat tovább könnyítheti az az új képességünk, hogy genetikai módosításokkal, génsebészettel gyakran tetszőlegesen megváltoztatott tulajdonságú anyagokat hozhatunk létre. A bakteriorodopszin jó példa erre a kutatási irányzatra is.

A bakteriorodopszin működése során különböző állapotaiban megváltoztatja színét. A reakciósor végén, amikor visszakerül alapállapotába, eredeti színét is visszanyeri. A színváltozások egyéb optikai tulajdonságok, például az optikai **törésmutató** változásával is járnak. Ha tehát a biológiai funkciótól eltekintünk, azt mondhatjuk a bakteriorodopszincről, hogy biológiai eredetű, fénygerjesztésre színét és egyéb optikai paramétereit átmenetileg megváltoztató anyag, vagyis nemlineáris optikai tulajdonságokkal rendelkezik. Ráadásul genetikai úton számos paramétere – színe, az alapállapotba való visszatérés ideje stb. – megváltoztatható. A változások mértéke jóval meghaladja az egyébként hasonló eszközökben felhasznált fényérzékeny anyagok jellemzőit. E tulajdonságok alapján felmerül az a lehetőség, hogy filmként, optikai adathordozóként, optoelektronikai eszközök aktív elemeként használhassuk. A gyakorlati hasznosítást megkönnyíti, hogy előállításuk igen egyszerű, az anyag pedig egyáltalán nem érzékeny, ugyanannyira tartós, mint bármely más szerves festék.

Bakteriorodopszin mint fényérzékeny anyag alkalmazásával nagyon jó minőségű fényérzékeny filmek készíthetők. Ezek a bakteriorodopszin filmek igen nagy felbontású képek, **dinamikus hologramok** rögzítésére képesek. Jelenleg sok területen, nagy intenzitással folynak fejlesztések, például az MTA Szegedi Biológiai Központjának Biofizikai Intézetében.

A **nemlineáris optikai anyagok** fontos felhasználási területe az optikai kapcsolók fejlesztése. A jelenkor információs technikájában az adattovábbítás optikai kábeleken történik. A kábelek kapcsolását is tisztán optikai úton kellene megoldani: mozgó alkatrészt nem tartalmazó, fénnel vezérelt optikai kapcsolók kifejlesztése volna a megoldás. Optikai tulajdonságai alapján a bakteriorodopszin alkalmas lehet e feladatok ellátására, mivel a törésmutató megváltozása elegendően nagy. Már készültek az ilyen kapcsolók működését demonstráló mintapéldányok. Persze a gyakorlati alkalmazás követelményei igen magasak, a valódi versenyképességet a jövő mutatja meg. Mindenesetre számos szabadalom tanúsítja az alkalmazási fejlesztéseket, már a kereskedelemben is kapható bakteriorodopszint használó holografikus mérőműszer.

Törésmutató:

fizikai mennyiség, mely valamely anyag fénytörő képességét jellemzi.

Dinamikus hologram:

időben változó tartalmú hologram (törölhető, újraírható).

Nemlineáris optikai anyag:

az egyszerű fénytani törvényektől eltérően viselkedő (például szín- és törésmutató-változtatásra képes) anyag.

Szórt fény:

a megvilágított testről a tér minden irányába rendezetlenül visszavert fény.

Fénykibocsátás a biológiában

Láttuk, a fény életünk táplálója, vezetője. Nem meglepő ezért, hogy olyan élőlények is vannak, amelyek képesek maguktól is fényt kibocsátani, mintegy módosítva ezzel azt a képet, amit pusztán a **szórt fény** segítségével alakíthatunk ki róluk. A legtöbb világító élőlény a tengerben él, de nagyon jól ismert szárazföldi példák is vannak – ilyen a szentjánosbogár. Az állatok



Szentjánosbogár

Fluoreszcencia:

némely vegyület bizonyos színű (pl. kék) fény elnyelésének hatására attól különböző színű (pl. zöld) fényt bocsát ki.

GFP (Green Fluorescent Protein) – Zöld fluoreszcens fehérje:

a természetben (egyes medúzákban) előforduló, fluoreszcenciára képes fehérje.

esetében a világításnak számos, a túlélést segítő szerepe van: a táplálék csalogatása, a támadó elijesztése, lehet továbbá párválasztási segédeszköz is, illetve akár egyszerre több funkciót is betölthet ezek közül.

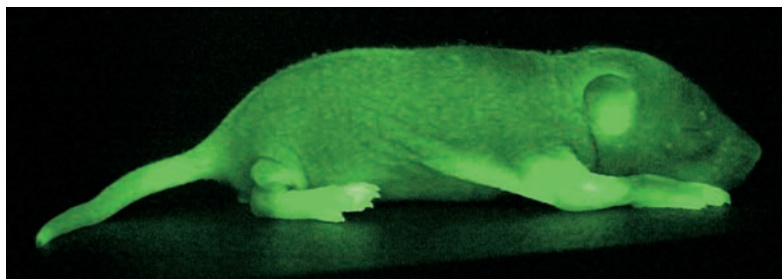
A világítás mechanizmusa alapvetően kétfajta lehet. A kibocsátott fény vagy **fluoreszcencia**, vagy kémiai reakció eredménye.

Zöld fluoreszcens fehérje

Az első esetben az élőlény az előzőleg elnyelt foton energiáját sugározza ki. A fluoreszcencia általános szabálya szerint a kibocsátott fény energiája kisebb, hullámhossza tehát nagyobb az eredetileg elnyelt fotonénál, ennek a folyamat során lezajló veszteség az oka. Nagyon sok festékanyag is fluoreszkál, ráadásul ez a folyamat nem a sötétben zajlik, ezért e világítási forma a biológiában általában kevésbé érdekes. Nemrégiben azonban felfedeztek egy különleges fluoreszkáló fehérjét – a zöld fluoreszcens fehérjét –, amelynek kiváló alkalmazási lehetőségei vannak, és sokat beszélnek róla manapság a genetikai kutatások kapcsán. Így nem árt, ha mi is megismerkedünk vele.

A fehérjék önmagukban nem színesek. Ennek az az oka, hogy az alkotó aminosav-molekulák egyike sem nyeli el a látható fényt. A színes fehérjék ezért adalék festékanyagot tartalmaznak, amelyet a fehérjéhez kell kapcsolni. Ilyen például a zöld növényekben a klorofill vagy a rodopszinban a retinal. Egészen a legutóbbi ideig azt hittük, ez alól nincs kivétel. Egy világító medúzát vizsgálva azonban kiderült, hogy fényét részben olyan fehérje adja, amely nem tartalmaz külön festékanyagot. Ezt nevezték el **zöld fluoreszcens fehérjének** (angol rövidítése: **GFP**). Lázasan vizsgálatokba kezdtek. Megállapították, hogy a váratlan tulajdonság a fehérje különleges szerkezetéből ered: néhány aminosav-oldallánc igen közel kerül egymáshoz. Bár ezek külön-külön nem képesek elnyelni a fényt, együtt, szorosan egymás közelében úgy viselkednek, mint egy fényelnyelő festékmolekula. Az el-

A bőrben zöld fluoreszcens fehérjét tartalmazó genetikusan módosított egerek [Nagy András, University of Toronto felvétele]



nyelt fény energiáját újra kisugározva a fehérje világítani képes. A jelenség önmagában is érdekes, de jelentőségét akkor tudjuk megérteni, ha felidéz-
zük, hogyan zajlanak mostanában a rendkívül aktív genetikai, génsebészeti
kutatások.

A fehérjék gyártása aminosav-sorrendjüket kódoló génjük alapján rutin-
eljárásnak számít. A géneket manapság szinte tetszőlegesen tudjuk módosí-
tani is, és ha ezekről a génekről fehérje készül, mindig alapvető kérdés, hogy
elkészült-e valóban a fehérje, hol van stb. Színtelen fehérjéket csak nehéz-
kesen lehet kimutatni. Erre viszont kiváló lehetőséget nyújt a GFP. A GFP
génjét ugyanis ismerjük, és hozzátoldhatjuk a legyártani kívánt fehérje gén-
jéhez. Ha ennek az összetett génnek a fehérjéjét is legyártjuk, a termék két
egymáshoz kapcsolódott fehérje lesz: az eredetileg gyártani kívánt példány
és hozzákapcsolódva a GFP. Megjelöltük tehát a fehérjénket, csak rá kell vi-
lágítani, és ha ott van, világít. Így azután a génsebészeti eljárások termékei
könnyen vizsgálhatók. Az ekképpen módosított laboratóriumi állatok lát-
ványa kissé hátborzongató, hiszen akár a bőrüket, szemüket alkotó fehér-
jékhez is hozzá lehet kapcsolni a zöld fluoreszcens fehérjét.

Kémiai lumineszcencia:

kémiai folyamatokat kísérő
fénykibocsátás.

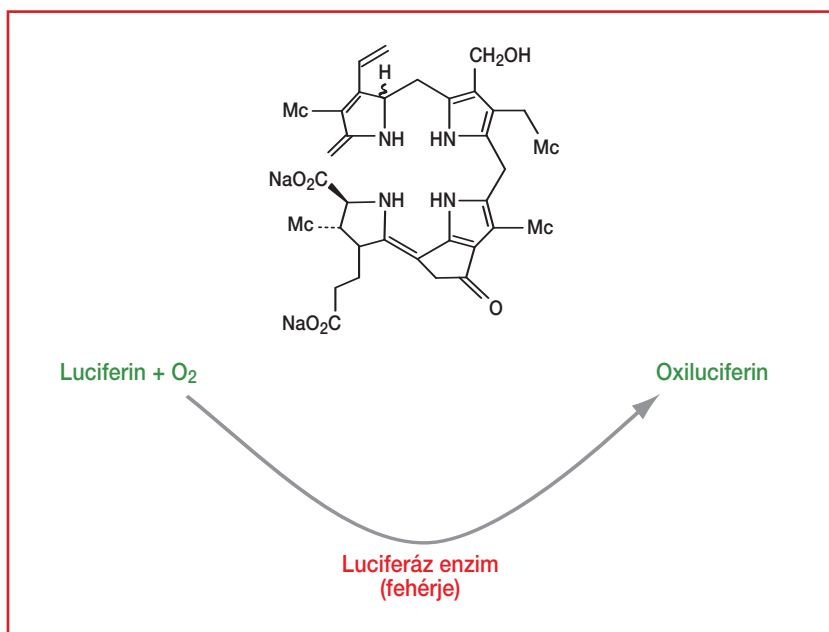
Luciferin:

szerves festékmolekula, mely-
nek oxigénnel való kémiai
reakciója fénykibocsátással jár
(pl. a szentjánosbogár esetén).

Kémiai lumineszcencia

A sötétben világító állatok **kémiai lumineszcenciával** keltenek fényt.
A tengerekben nagyon sok olyan állat él, amelynek megvan ez a képessé-
ge. De a részletes vizsgálat azt mutatja, hogy a konkrét megvalósulások
annyira különböznek, hogy az evolúció során egymástól függetlenül is ki-
alakultak világító rendszerek. Van azért a működésnek néhány általános
szabálya.

A fénykibocsátás két alapvető kémiai komponensen alapul. Az egyik a
kémiai reakció nyomán fényt kibocsátó festékmolekula, a **luciferin**. A má-
sik a reakciót segítő, katalizáló fehérje, a **luciferáz**. A fényt kibocsátó lépés-



A kémiai lumineszcencia
reakciósémája

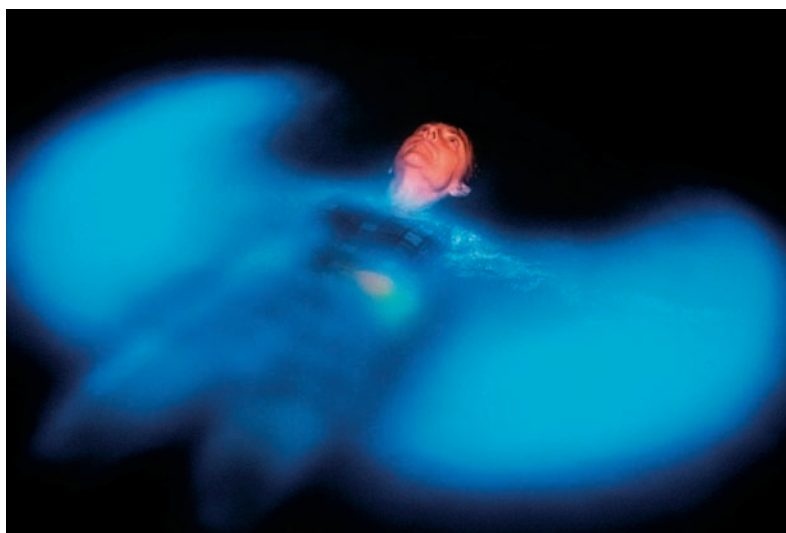
Luciferáz:

a luciferin fénykibocsátással járó oxidációját segítő fehérje (enzim).

ben ezeken túl még energiahordozó ATP-molekulákra is szükség van. A reakció során a luciferin oxidálódik, és fényt bocsát ki; azaz elhasználódik a luciferin és az ATP. Ez a világítás az izzólámpákkal ellentétben hideg fényt ad, ezért hatásfoka nagyon magas. Mifelénk a legismertebb ilyen állat a szentjánosbogár.

A tévében, a magazinokban sok lenyűgöző képet láthatunk világító halakról. Most azonban egy szokatlan, de nagyon látványos illusztrációval fejezném be előadásomat. Vannak olyan egysejtűek, amelyek akkor világítanak, ha mechanikai stressz éri őket, és nagyon kis nyomásváltozásokra is reagálnak.

Úszó ember körül világító planktonok [Frank Borges Llosa felvétele]



A Karib-tengeren, Puerto Rico közelében egyes öblökben igen nagy számban élnek ezek az élőlények. Itt a vizet ért legkisebb zavar is kiváltja a világító reakciót, ami a csónakok közelében vagy akár az úszó ember által megkevert vízben megdöbbentő fényeffektusokat eredményez.

Remélem, előadásom érdekes ismeretekkel szolgált a fény és az élet kapcsolatáról.

Ajánlott irodalom

- Colowick, N. – Kaplan, N. – Sies, H. (eds.):* Methods in Cell Biology: Biomembranes. Part I: Visual Pigments and Purple Membranes II, Vol. 88, New York: Academic Press, 1982.
- Colowick, N. – Kaplan, N. – Sies, H. (eds.):* Methods in Cell Biology: Biomembranes. Part H: Visual Pigments and Purple Membranes I, Vol. 81, New York: Academic Press, 1982.
- DeLuca, M. A. (ed.):* Methods in Enzymology: Bioluminescence and Chemiluminescence. Vol. 57, New York: Academic Press, 1978.
- DeLuca, M. A. – McElroy, W. D. (eds.):* Methods in Enzymology: Bioluminescence and Chemiluminescence Part B. Vol. 133, Orlando: Academic Press, 1986.
- Láng Ferenc (szerk.):* Növényélettan: a növényi anyagcsere. Bp.: Eötvös, 1998.
- Kozma-Bognár László – Nagy Ferenc:* Biológiai ritmusok, molekuláris órák. *Természet Világa*, 133. (2002) 1. sz., 12–16. p.
- McIntosh, L. – Colowick, S. P. (eds.):* Methods in Enzymology: Photosynthesis. Molecular Biology of Energy Capture. Vol. 297, San Diego: Academic Press, 1998.
- Rontó Györgyi – Tarján Imre:* A biofizika alapjai. Bp.: Medicina, 1997.
- Szalay László – Damjanovich Sándor (szerk.):* Lumineszcencia a biológiában és az orvostudományban. Bp.: Akadémiai K., 1983.
- Szalay László – Ringler András:* Biofizika. Bp.: Tankönyvkiadó, 1986.
- Ziegler, M. M., – Baldwin, T. O. (eds.):* Methods in Enzymology: Bioluminescence and Chemiluminescence Part C. Vol. 305, San Diego: Academic Press, 2000.

